

# Estudo de turbulência gerada por OGT observada por PIV<sup>1</sup>

Study of turbulence generated by OGT observed by PIV

**Amanara Dias Vieira**<sup>2</sup>

Universidade de São Paulo  
amanara@sc.usp.br

**Woodrow Lopes Roma**<sup>2</sup>

Universidade de São Paulo  
woodrow@sc.usp.br

---

**Resumo.** A turbulência é considerada um regime de movimento caótico do fluido. Porém, apesar dessa natureza do regime, estudos numéricos podem ser usados na tentativa de encontrar uma face determinística do fenômeno. Neste trabalho, utilizou-se um tanque com grade oscilante (OGT – *oscillating grid tank*) para geração de turbulência isotrópica e homogênea e a técnica PIV (*particle imaging velocimeter*) para observar e quantificar a turbulência gerada. O método de velocimetria com o uso de PIV mostrou-se ser adequado para a observação de campos de velocidades de um escoamento, com limitações quanto à região periférica da área alvo. Os resultados mostraram que o escoamento gerado no tanque em estudo aproximou-se de condições homogêneas, porém, sua isotropia não pôde ser confirmada.

**Palavras-chave:** homogeneidade, isotropia, turbulência, PIV.

**Abstract.** Turbulence is considered a chaotic motion regime of the fluid. Despite the chaotic behavior of this regime, the researchers use numerical studies in an attempt to find a deterministic view of the phenomenon. In this work, an oscillating grid tank was used to generate turbulence and PIV technique was used to observe and quantify the generated turbulence. The PIV method showed to be suitable for observation of a flow velocity field with limitations on the peripheral region of the target area. The results showed that the generated flow in the tank approached homogeneous conditions, but isotropy cannot be affirmed.

**Keywords:** homogeneity, isotropy, PIV, turbulence.

---

## Introdução e objetivos

Dentre os fenômenos relacionados aos fluidos, o regime turbulento sempre foi de difícil compreensão. A turbulência é um regime de escoamento em que as forças de inércia predominam sobre as forças viscosas. Bradshaw (1975) diz que a turbulência é um movimento tridimensional, dependente do tempo, no qual

o estiramento de vórtices causa flutuações da velocidade, que se espalham por todos os comprimentos de onda entre um mínimo determinado pelas forças viscosas e um máximo determinado por condições de contorno do escoamento. Rouse *et al.* (1959) dizem que, ao invés de seguir caminhos facilmente identificáveis, as partículas de fluidos em regime de escoamento turbulento movem-se de forma ir-

---

<sup>1</sup> Este artigo foi originalmente publicado na IX Escola de Primavera de Transição e Turbulência, São Leopoldo, 2014. Disponível em: [http://www.abcm.org.br/anais/eptt/2014/eptt\\_anais\\_modificado.pdf](http://www.abcm.org.br/anais/eptt/2014/eptt_anais_modificado.pdf)

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador Sancerlense, 400, Parque Arnold Schimidt, 13566-590, São Carlos, SP, Brasil.

regular, podendo ser descritas como um movimento heterogêneo secundário sobreposto ao escoamento médio. Um conceito conveniente é que, em um regime turbulento, existem vórtices de diversas formas, tamanhos e velocidades rotacionais sendo levados ao longo do escoamento principal. O regime turbulento ainda não é um fenômeno completamente compreendido, principalmente devido às dificuldades existentes na sua quantificação.

Com o passar dos anos, o problema de quantificação e equacionamento da turbulência foi abordado por diversas frentes de estudo. Novas técnicas de instrumentação permitiram que se passasse da observação (visual) com uso de corantes a medições usando sensores, chegando até ao desenvolvimento da velocimetria com *lasers* e câmeras de alta velocidade. Um aspecto importante foi a melhoria na velocidade de processamento dos computadores, facilitando a obtenção de respostas de simulações e de cálculos numéricos.

Visando facilitar o estudo da turbulência, pesquisadores vêm explorando uma alternativa mais simples do regime, a turbulência isotrópica e homogênea. O equacionamento desse tipo de turbulência exige um menor número de parâmetros e relações. Porém, apesar de mais simples, a turbulência isotrópica, assim como a homogênea, possui características comuns a todos os escoamentos turbulentos, e sua compreensão permite que se esclareçam questões referentes às formas mais complexas de turbulência (Townsend, 1976).

Um equipamento que vem sendo utilizado na tentativa de geração de turbulência isotrópica e homogênea em laboratório é o tanque com grade oscilante (*OGT – oscillating grid tank*). O *OGT* é um equipamento composto por um tanque, normalmente de acrílico, e uma, ou mais, grade oscilante, além de um sistema mecânico que converte as rotações do motor em oscilações da grade.

Naturalmente, o aprimoramento de equipamentos, instrumentos e, conseqüentemente, a obtenção de dados de maior qualidade, levaram à tentativa de caracterizar e até mesmo equacionar o regime turbulento. Tendo em vista as recentes contribuições existentes na parametrização e no equacionamento da turbulência, torna-se evidente a necessidade de validação desses estudos por pesquisadores independentes.

Neste trabalho, utilizou-se um tanque com uma grade oscilante para a geração de escoamento em regime turbulento na água. O objeti-

vo foi observar o comportamento da turbulência gerada, atentando-se principalmente para a ocorrência de homogeneidade e isotropia. As velocidades do escoamento gerado foram medidas por um sistema PIV estereoscópico. Outro aspecto observado na pesquisa foi o decaimento da turbulência na seção observada, comparando os resultados com dois modelos de decaimento da turbulência existentes na literatura (Thompson e Turner, 1975; Hopfinger e Toly, 1976).

## Revisão bibliográfica

### *Velocimetria por imagens de partículas (PIV)*

Em 1984, o termo PIV (velocimetria por imagens de partículas) apareceu pela primeira vez na literatura (Adrian, 2005). O PIV é um método de velocimetria que se utiliza da captura de imagens de partículas inseridas no fluxo em estudo e é muito utilizado atualmente nos estudos de turbulência.

As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, uma imagem obtida por um sistema PIV e um mapa de vetores bidimensional gerado a partir de um par de imagens durante o trabalho de Vieira (2012).

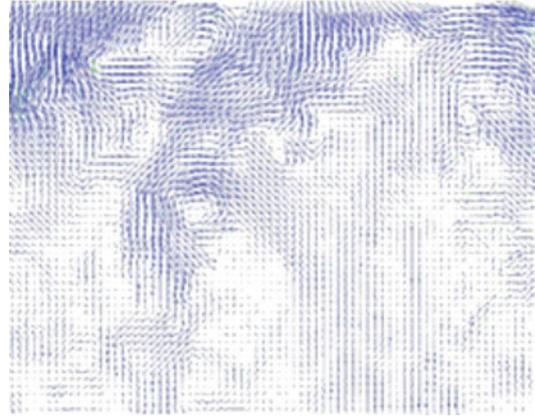
Széliga e Roma (2009) desenvolveram um sistema PIV (equipamento e *software*) e efetuaram medidas na superfície líquida da interface ar/água. O equipamento de medição é similar aos convencionais, porém, com características inovadoras e exclusivas, que resultaram na utilização de uma única câmera e um conjunto de espelhos para obtenção de imagens e dados tridimensionais em escoamentos de baixa turbulência. O equipamento foi utilizado na medição de velocidades turbulentas na superfície líquida em um tanque de grades oscilantes que foram correlacionadas com o coeficiente de reaeração do corpo d'água.

No trabalho de Turney e Banerjee (2010), foram propostas novas técnicas denominadas Velocimetria de Imagens de Partículas Interfacial (IPIV) e Tridimensionais IPIV (3D-IPIV) para medir os campos de fluxo próximo à superfície e à morfologia interfacial simultaneamente, aplicados para escoamentos em canais abertos e condições de ondas provocadas pelo vento.

Kat e van Oudheusden (2012) determinaram campos de pressões em um escoamento turbulento gerado em laboratório utilizando PIV para aquisição de velocidades.



**Figura 1.** Imagem obtida pelo PIV.  
**Figure 1.** PIV image



**Figura 2.** Mapa de vetores 2D.  
**Figure 2.** Vector map 2D

Fonte: Extraído de Vieira (2012), cedida pelos proprietários do copyright, ABCM (Rio de Janeiro, Brasil).

### *Tanque com grade oscilante*

O tanque com grade oscilante começou a ser usado na década de 1960 como equipamento gerador de turbulência em laboratório, assim como na tentativa de geração de turbulência isotrópica e homogênea (Comte-Bellot e Corrsin, 1966; Bouvard e Dumas, 1967; Thompson e Turner, 1975; Hopfinger e Toly, 1976).

A solidez da grade, relação entre a área horizontal (sólida) ocupada pela grade e a área total da superfície do tanque, é um parâmetro importante e costuma ser o ponto de partida para o dimensionamento de tanques com grade oscilante. Segundo Corrsin (1966), a estrutura de jatos e esteiras formados pela grade fica instável se a solidez da grade for superior a 40%.

Righetto (2008) desenvolveu e calibrou um tanque com grade oscilante. A calibração do tanque foi executada conjuntamente com o levantamento do coeficiente de reaeração  $K_2$  para dois tipos de grade.

Janzen *et al.* (2011) realizaram medidas do fluxo interfacial de oxigênio na água em tanque com grades oscilantes. O perfil experimental do fluxo turbulento de massa próximo da interface ar/água foi comparado com a predição usando a difusividade turbulenta aproximada por séries de potência em função da distância da interface. O campo de velocidade foi medido usando a técnica PIV.

As condições de quase isotropia e homogeneidade dependem diretamente das dimensões e posicionamento da grade no interior do tanque, frequência e amplitude das oscilações.

Janzen (2003) diz que a turbulência gerada por um OGT tende a possuir propriedades isotrópicas e homogêneas em regiões mais distantes da grade. Cheng e Law (2001) afirmam que a homogeneidade só pode ser alcançada a partir de pontos a 3 *mesh* (espaçamento entre as barras) de distância do ponto médio de oscilação da grade. Krogstad e Davidson (2011) investigaram a geração de turbulência por um túnel de vento com grades. A homogeneidade do regime turbulento também foi alcançada a alguma distância das grades.

### *Decaimento da turbulência*

Condições de isotropia e homogeneidade ocorrem a certa distância do centro de oscilação, por isso pesquisadores estudam como ocorre a variação da velocidade no espaço do sistema. Thompson e Turner (1975) afirmam que a velocidade turbulenta gerada em um tanque com grade oscilante varia no espaço obedecendo à equação 1:

$$\vec{V} = 1,4 \cdot f \cdot S^{2,5} \cdot z^{-1,5} \quad (1)$$

Sendo,

$\vec{V}$ : velocidade (cm/s);  
 $f$ : frequência de oscilação da grade (Hz);  
 $S$ : amplitude de oscilação da grade (cm);  
 $z$ : distância do ponto de medição da velocidade ao centro de oscilação da grade (cm).

Segundo Hopfinger e Toly (1976), existe influência da geometria da grade na veloci-

dade do decaimento, por isso os autores modificaram a equação 1 e adicionaram o parâmetro *Mesh*, que quantifica a geometria da grade e define a constante *C*, de acordo com a equação 2.

$$\vec{V} = C \cdot S^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot f \cdot z^{-1} \quad (2)$$

Sendo,

*C*: constante relativa à geometria da grade.

Para *Mesh* igual a 5, *C* vale 0,25;

*M*: *Mesh*, razão entre distância entre as barras da grade e a sua espessura.

Os resultados adquiridos neste trabalho foram comparados às duas equações.

## Metodologia

O experimento foi realizado no Laboratório de Fenômenos de Transporte, na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Um tanque de grade oscilante prismático de acrílico, montado por Righetto (2008), com base de  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$  e  $1 \text{ m}$  de altura, foi preenchido com água até uma altura de  $55 \text{ cm}$ . A grade quadrada de  $49 \text{ cm}$  de lado, montada com barras de seção  $10 \times 10 \text{ mm}$  e  $5 \text{ cm}$  de espaçamento entre elas apresentou 27,98% de solidez. A grade estava localizada a  $16 \text{ cm}$  do fundo do tanque e movimentava-se com  $10 \text{ cm}$  de amplitude.

Controlando as rotações do motor, foi possível alterar a quantidade de oscilações por minuto da grade. As frequências adotadas nos testes foram: 18,25; 38,00; 57,25; 95,50; 118,00; 135,25; 154,25 e 175,00 *opm* (oscilações da grade por minuto).

A turbulência gerada foi medida com um sistema PIV digital estereoscópico da DANTEC Dynamics. O sistema era composto por duas câmeras digitais CCD SpeedSense 9020, um *laser* e sua fonte, um microcomputador provido do pacote de *softwares* DynamicStudio, versão 2.30 e partículas revestidas com prata, inseridas na água. A disposição do sistema é mostrada através do esquema na Figura 3.

A seção selecionada para observação foi uma área de  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ , distante  $20 \text{ cm}$  do centro de oscilação da grade. As partículas no interior do fluido movimentavam-se devido à agitação causada pelas oscilações da grade. O movimento de partículas ocorrido na seção observada era iluminado pelo *laser* e capturado pelas duas câmeras do sistema.

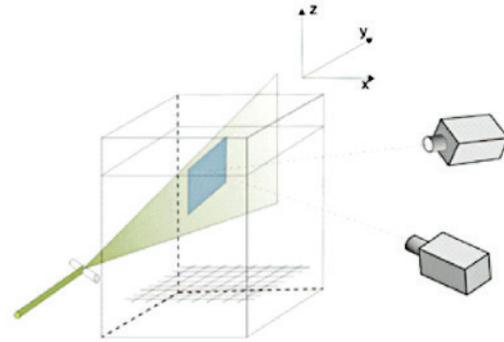


Figura 3. Esquema sistema PIV.

Figure 3. Configuration PIV.

Fonte: Extraído de Vieira (2012), cedida pelos proprietários do copyright, ABCM (Rio de Janeiro, Brasil).

Cada câmera capturava 1.024 pares de imagens, com intervalo de tempo entre os pares de  $0,001 \text{ s}$ , para cada frequência de oscilação da grade. Essas imagens da seção de ensaio eram divididas pelo *software* em uma matriz de 66 linhas e 53 colunas. A partir do deslocamento do grupo de partículas contidas em cada célula dessa matriz, eram calculadas as velocidades, que aparecem como vetores em mapas bidimensionais. Esses mapas foram gerados para cada par de imagens de uma única câmera, ou seja, foram gerados 1.024 mapas bidimensionais por câmera. O mapa de velocidades tridimensional foi gerado com a associação dos mapas bidimensionais das duas câmeras, obtidos no mesmo instante do tempo.

A pesquisa se propôs a investigar a ocorrência de homogeneidade e isotropia na turbulência gerada e também atentar para o decaimento da turbulência. Para isso, foram utilizados os dados dispostos em planilhas, que continham as três componentes das velocidades e a velocidade resultante de cada um dos 3.498 (66 linhas  $\times$  53 colunas) pontos dos mapas tridimensionais obtidos para cada frequência de oscilação da grade. Foram desenvolvidas sub-rotinas em MatLab para tratamento dos dados e investigação da homogeneidade e isotropia.

## Homogeneidade

A homogeneidade de um escoamento pode ser comprovada quando as médias temporais da velocidade em cada ponto da seção observada se igualam. Em um regime turbulento, a média temporal considerada deve ser a média quadrática RMS.

$$RMS_{\text{ponto1}} \cong RMS_{\text{ponto2}} \cong RMS_{\text{ponto3}} \cong RMS_{\text{ponton}} \quad (3)$$

Essa igualdade entre as médias não é obtida na prática, sendo necessária uma ferramenta estatística para verificar a homogeneidade. A proximidade de valores das amostras foi averiguada utilizando um gráfico de desvio-padrão de grandes amostras (Leme, 1965).

O gráfico utilizado para o controle de dispersão das amostras é o apresentado na Figura 4. O desvio padrão é apresentado pela equação 4:

$$\sigma : \sqrt{\frac{\sum[(x_i - \bar{u})^2]}{n - 1}} \quad (4)$$

Sendo,

$\sigma$  : Desvio padrão;

$x_i$  : Valor do elemento x no instante i;

$\bar{u}$  : Média dos valores;

n : Número de elementos.

O gráfico possui três zonas de confiabilidade. A zona I é delimitada pelo próprio . Se 68,2% das amostras estiverem inseridas na zona I, isso mostra que existe controle no processo.

### Mapas cromáticos

Após a obtenção dos primeiros resultados, observou-se a existência de pontos com velocidades nulas. Visando localizar esses pontos e compreender sua causa, foram elaborados mapas cromáticos, que expõem, através de cores, regiões com maiores e menores velocidades. Posteriormente à localização desses pontos e à discussão apresentada nos resultados deste trabalho, optou-se por eliminar os pontos de velocidade nula, resultando uma matriz de 3.250 pontos. Todas as sub-rotinas foram aplicadas considerando essa nova matriz.

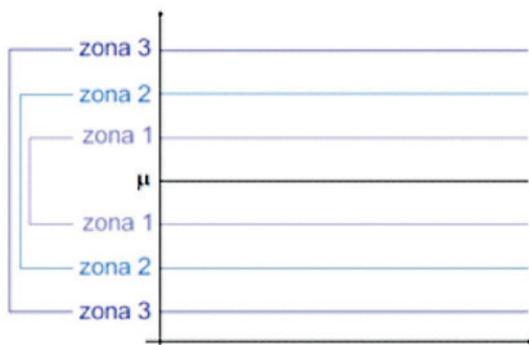


Figura 4. Gráfico para controle de dispersão.  
Figure 4. Graphic for dispersion control.

### Isotropia

A isotropia de um escoamento é confirmada quando a razão entre as médias das componentes da velocidade é igual a 1 (Equação 5). Assim como no caso da homogeneidade, na prática, essa situação só ocorre de forma aproximada. Neste trabalho, impôs-se o limite superior 1,2 e inferior 0,83, seguindo valores propostos no trabalho de Barra (2002).

$$\frac{RMS_u}{RMS_v} \cong 1$$

$$\frac{RMS_u}{RMS_v} \cong 1 \quad (5)$$

$$\frac{RMS_u}{RMS_v} \cong 1$$

### Decaimento da turbulência

Uma sub-rotina foi desenvolvida para observar como se dá a variação da intensidade turbulenta desde próximo à grade até a superfície da seção observada e comparar os dados observados com os resultados apresentados pelos modelos de decaimento propostos por Thompson e Turner (1975) e Hopfinger e Toly (1976). Para obter uma curva dos dados experimentais, calculou-se o valor RMS da velocidade turbulenta ao longo do tempo, gerando uma única matriz de valores para cada frequência de oscilação da grade. A partir da matriz, gerou-se uma única coluna de valores, considerando a média simples de cada linha. Essa coluna, que representa os valores médios das velocidades resultantes no sentido vertical, mostra o decaimento da turbulência no tanque.

### Resultados e discussões

Nesta seção, estão apresentados os resultados referentes ao comportamento da turbulência gerada pelo experimento.

### Homogeneidade

O gráfico de controle de dispersão mostrado na Figura 5 apresenta, no eixo das abscissas, os pontos da matriz e, no eixo das ordenadas, os valores das médias RMS das velocidades, para uma única frequência de oscilação da grade.

No gráfico, é possível observar a existência de pontos com médias RMS nulas. O mapa cromático, apresentado na Figura 6, mostra a localização desses pontos. Observou-se que eles ocorrem nas regiões periféricas da imagem e se devem a uma limitação do PIV, que precisa relacionar a posição anterior e posterior das partículas para obter o deslocamento e, conseqüentemente, a velocidade. Por causa dessa limitação, optou-se pela remoção de uma coluna do lado esquerdo, duas colunas do lado direito e uma linha superior, resultando em uma matriz com 3.250 pontos.

A Tabela 1 apresenta os resultados de homogeneidade em porcentagem. A maior porcentagem de pontos fora dos limites impostos pelo mapa de controle de dispersão (24%) ocorre quando a grade oscila a 175 opm (oscilações por minuto). A menor porcentagem de pontos fora dos limites (5%) ocorre para 18,25 opm. A homogeneidade foi confirmada para todas as frequências de oscilação, já que mais de 68% dos pontos ficam inseridos dentro dos limites em todos os casos.

### Isotropia

Em todas as rotações, a turbulência gerada no tanque aproximou-se de um comportamento isotrópico nas regiões superficiais e em baixas velocidades de oscilação da grade.

Nos primeiros resultados, foi possível verificar que, quando a componente  $W$  é inserida nos cálculos, esses valores distanciam-se muito dos limites impostos. Isso ocorre porque a componente  $W$ , que está na direção  $z$  (vertical), sofre maior influência com o movimento

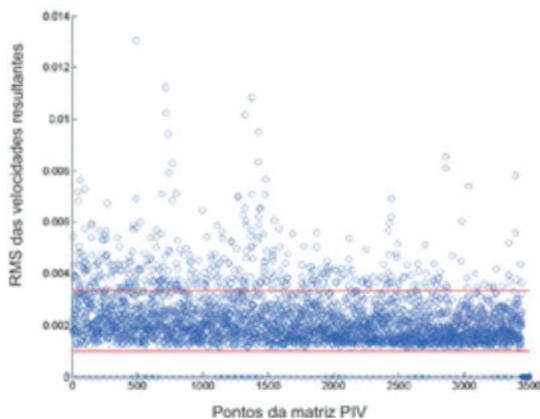
da grade. Vale ressaltar que a proximidade da superfície e a tensão superficial podem interferir nos valores de  $W$ . Isso porque a superfície interfere nas medidas, e a tensão superficial causa interferência na própria velocidade.

As medidas realizadas para os três primeiros valores de oscilação da grade (18,25; 38,00 e 57,25 opm) apresentaram comportamento mais próximo à isotropia. As razões entre os valores RMS das componentes das intensidades turbulentas para maiores velocidades de oscilação da grade (95,50; 118,00; 135,25; 154,25 e 175,00 opm) ficaram, em sua maioria, fora dos limites impostos, mesmo desconsiderando as razões que envolvam a componente  $W$ . A quantidade de pontos fora dos limites para a razão entre os valores RMS das componentes  $U$  e  $V$  variou de 27% para 57,25 opm (melhor resultado) a 93% dos pontos fora do limite para 175 opm (pior resultado), conforme se vê na Tabela 2.

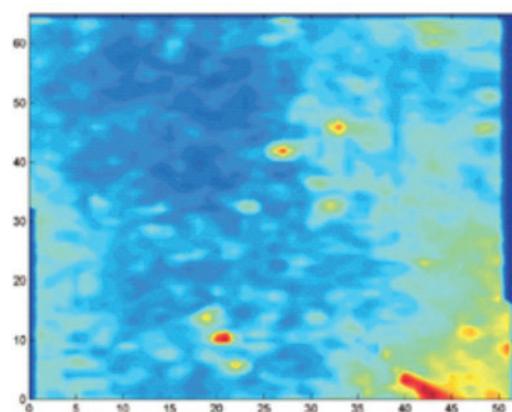
### Decaimento da turbulência

Após a obtenção dos resultados experimentais, as velocidades turbulentas obtidas foram comparadas com velocidades resultantes dos modelos de Thompson e Turner (1975) e Hopfinger e Toly (1976).

Conforme esperado, o modelo de Hopfinger e Toly (1976) está mais próximo dos resultados experimentais do que o modelo de Thompson e Turner (1975), devido ao parâmetro de correção  $M$  (*Mesh*) existente no primeiro modelo. A constante  $C$  existente no modelo de Hopfinger e Toly (1976) também está relacionada à geometria da grade.



**Figura 5.** Gráfico de homogeneidade com zeros.  
**Figure 5.** Homogeneity graph with zeros.



**Figura 6.** Mapa cromático com zeros.  
**Figure 6.** Chromatic map with zeros.

Fonte: Extraído de Vieira (2012), cedida pelos proprietários do copyright, ABCM (Rio de Janeiro, Brasil).

**Tabela 1.** Homogeneidade.**Table 1.** Homogeneity.

Oscilações (opm)	Zona	Pontos fora dos limites (3.250)	Pontos fora dos limites (%)
18,25	I	154	5
	II	0	0
	III	0	0
38	I	486	15
	II	0	0
	III	0	0
57,25	I	669	21
	II	0	0
	III	0	0
95,5	I	577	18
	II	0	0
	III	0	0
118	I	632	19
	II	0	0
	III	0	0
135,25	I	647	20
	II	0	0
	III	0	0
154,25	I	699	22
	II	0	0
	III	0	0
175	I	772	24
	II	0	0
	III	0	0

Fonte: Extraído de Vieira (2012), cedida pelos proprietários do copyright, ABCM (Rio de Janeiro, Brasil).

**Tabela 2.** Isotropia.**Table 2.** Isotropy.

Oscilações (opm)	Zona	Pontos fora dos limites (3.250)	Pontos fora dos limites (%)
18,25	U e V	1187	37
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
38	U e V	1079	33
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
57,25	U e V	865	27
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
95,5	U e V	2093	64
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
118	U e V	2514	77
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
135,25	U e V	2384	73
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
154,25	U e V	2454	76
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
175	U e V	3025	93
	U e W	3250	100
	V e W	2355	72

Fonte: Extraído de Vieira (2012), cedida pelos proprietários do copyright, ABCM (Rio de Janeiro, Brasil).

Os valores obtidos com o modelo de Thompson e Turner (1975) ficaram muito distantes dos resultados experimentais. O grande distanciamento do modelo causa uma atenuação na escala, interferindo na visualização dos dados. Portanto, optou-se pela omissão da curva desse modelo.

Normalizando os resultados e os valores obtidos pelos dois modelos, verificou-se que os modelos seguem a mesma tendência dos resultados experimentais. A Figura 7 apresenta os gráficos gerados para duas frequências de oscilação da grade.

## Conclusões

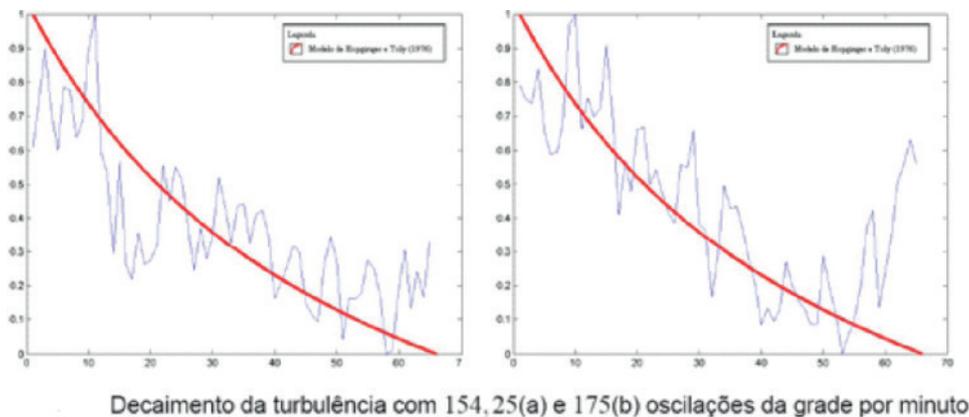
A partir da pesquisa realizada e dos resultados experimentais obtidos, pode-se dizer que o tanque de grade oscilante utilizado é um bom equipamento para geração de turbulência em laboratório e consegue produzir regimes turbulentos com características homogêneas. O PIV estereoscópico mostrou ser eficiente na observação de campos de velocidade, apesar de limitações na região periférica.

A turbulência teve comportamento homogêneo em toda a seção observada, ou seja, a intensidade turbulenta apresentou comportamento semelhante em todos os pontos da matriz. Quanto à isotropia, não é possível afirmar que o tanque de grade oscilante utilizado gera uma turbulência isotrópica. A afirmação só seria possível se as três componentes da intensidade turbulenta tivessem apresentado comportamento análogo, o que não ocorre. O módulo da velocidade  $W$  varia no espaço en-

tre o centro de oscilação da grade e a superfície. Próximo à grade, a componente  $W$  (componente da velocidade no eixo  $z$ ) é a mais afetada pelas oscilações, ficando com valores muito maiores que os valores das outras duas componentes. Na superfície, a componente  $W$  da velocidade é atenuada. Neste trabalho, a área observada estava muito próxima à superfície. Seria interessante, para a observação da isotropia, selecionar mais regiões entre a grade e a superfície para medidas de intensidade turbulenta.

Quanto à velocimetria por imagens de partículas, a concentração ideal de partículas foi controlada visualizando-se a qualidade das imagens. O *laser* utilizado para iluminar a seção do escoamento era pulsado, e o tempo entre os pulsos do *laser* era definido pelo *software*. Esse valor padrão mostrou-se adequado, já que as partículas apareciam como circunferências nítidas nas imagens, sem ocorrência de *blurring* (circunferências embaçadas ou até mesmo traços). Foi possível notar que, nas regiões periféricas da matriz, o funcionamento do PIV fica prejudicado, pois, na segunda imagem (considerando o par de imagens), algumas partículas podem estar fora da área observada. A observação da turbulência na superfície continua sendo uma dificuldade, pois essa região é afetada pela tensão superficial, e a superfície interfere na iluminação, alterando a trajetória do *laser*.

A turbulência gerada no tanque decai na seção observada (seção localizada entre a grade oscilante e a superfície livre da água). Esse decaimento segue a mesma tendência que o Modelo de Hopfinger e Toly (1976).



**Figura 7.** Decaimento da turbulência.

**Figure 7.** Turbulence decay.

Fonte: Extraído de Vieira (2012), cedida pelos proprietários do copyright, ABCM (Rio de Janeiro, Brasil).

## Referências

- ADRIAN, R.J. 2005. Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, **39**(2):159-169. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-005-0991-7>
- BARRA, L. 2002. *Estudo da estrutura turbulenta em escoamentos gerados por grades oscilantes*. São Carlos, SP. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 134 p.
- BRADSHAW, P. 1975. *An introduction to turbulence and its measurement*. Pergamon Press, 218 p.
- BOUVARD, M.; DUMAS, H. 1967. Application de la méthode de fil chaud à la mesure de la turbulence dans l'eau. *La Houille Blanche*, (3):257-270.
- CHENG, N.S.; LAW, A.W.K. 2001. Measurements of turbulence generated by oscillating grid. *Journal of Hydraulic engineering*, **127**(3):201-208. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:3\(201\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:3(201))
- COMTE-BELLOT, G.; CORRSIN, S. 1966. The use of contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. *Journal of fluid mechanics*, **25**(4):657-682. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112066000338>
- CORRSIN, S. 1963. *Turbulence: Experiments methods*. Handbuch der physic, Stromungs mechanic, 1963;
- HOPFINGER, E.J.; TOLY, J.A. 1976. Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, **78**(1):155-175. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112076002371>
- JANZEN, J.G. 2003. *Detalhamento das propriedades turbulentas em água agitada por grades oscilantes*. São Carlos, SP. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- JANZEN, J.G.; SCHULZ, H.E.; JIRKA, G.H. 2011. *Turbulent gas flux measurements near the air-water interface in an oscillating-grid tank*. GTWS 2010. Tokio, Kyoto University Press, 65-77 p.
- KAT, R.; VAN OUDHEUSDEN, W. 2012. Instantaneous planar pressure determination from PIV in turbulent flow. *Exp. Fluids*, **52**(5):1089-1106. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-011-1237-5>
- KROGSTAD, P.A.; DAVIDSON, P.A. 2011. Freely-Decaying, homogeneous turbulence generated by multi-scale grids. *Journal of Fluid Mech*, Vol.1.19 p.
- LEME, R.A. da S. 1965. *Curso de estatística: elementos*. Rio de Janeiro, Ao livro técnico S.A., 292 p.
- RIGHETTO, M.M. 2008. *Desenvolvimento e calibração de um tanque de reaeração equipado com grade oscilante*. São Carlos, SP. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 177 p. <http://dx.doi.org/10.11606/d.18.2008.tde-28042009-134500>
- ROUSE, H.; APPEL, D.W.; HUPBARD P.G.; LANDWEBER, L.; LAURSEN E.M.; MCNOWN J.S.; TIGO T.T.; TOCH, A.; YIH, C.S. 1959. *Advanced mechanics of fluids*. Iowa, Iowa Institute of Hydraulic Research.
- SZÉLIGA, M.R.; ROMA, W.N.L. 2009. Estudos de Reaeração com Velocimetria por Imagens de Partículas - Sistema S-PIV-3D. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **14**(4):499-510. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522009000400010>
- THOMPSON, S.M.; TURNER, J. 1975. Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *Journal of Fluid Mechanics*, **67**(2):349-368. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112075000341>
- TOWNSEND, A.A. 1976. *The structure of turbulent shear flow*. New York, Cambridge University Press, 442 p.
- TURNER, D.; BANERJEE, S. 2010. *Near surface turbulence and its relationship to air-water gas transfer rates*. Tokio, GTWS, 15 p.
- VIEIRA, A.P.S.D. 2012. *Estudo de estrutura turbulenta gerada por tanque de grade oscilante observada por PIV*. São Carlos, SP. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 87 p. <http://dx.doi.org/10.11606/d.18.2012.tde-03092012-163328>

Submetido: 09/12/2014

Aceito: 31/08/2015